

Artículo/Article
Vol. 17, nro. 1
e3423

Diseño de un prototipo de batería de flujo redox de vanadio

Laura E. de Jongh Salazar [1], José M. Barriola Damborenea [1], María E. Álvarez Bermúdez [1], Miguel M. Perez Hernández [1*]

[1]Universidad Metropolitana, Facultad de Ingeniería, Departamento de Energía y Automatización, Caracas, Venezuela.

*Autor para correspondencia, email: mperez@unimet.edu.ve

Design of a vanadium redox flow battery prototype

Resumen

Las baterías de flujo redox de vanadio (BFRV) son alternativas prometedoras para mitigar la intermitencia de las redes eléctricas basadas en generación renovable, aunque requieren estudios y optimización. Este trabajo presenta el diseño teórico de un prototipo de BFRV de una celda a escala de laboratorio, con un sistema de recirculación de electrolito y un sistema de medición de variables, destinado a ser utilizado en la Universidad Metropolitana como herramienta educativa. A través de la investigación documental, se identificaron los criterios de diseño más importantes, definiendo las características que el diseño debía cumplir. La celda diseñada incluye canales de flujo en forma de serpentín, colectores de corriente de cobre y grafito, electrodos de fieltro de grafito y una membrana iónica. El sistema incorpora dos bombas peristálticas y sensores de corriente, voltaje, conductividad, temperatura y nivel del electrolito, conectados a un Arduino UNO. El diseño permite tres configuraciones con diferentes tamaños de electrodos (6, 12 y 24 cm^2) y la variación del volumen de electrolito, su concentración y caudal. Se concluyó que el VOSO4 es la fuente de vanadio óptima debido a su alta solubilidad. El sistema de monitoreo y control, implementado con Arduino, permite obtener mediciones precisas y en tiempo real, facilitando la recolección de datos. El costo estimado del prototipo es de 1 025 USD, recomendándose la inclusión de sensores de conductividad por su importancia para estimar el estado de carga (SoC). Los resultados teóricos obtenidos mediante simulación en MATLAB son consistentes con las expectativas, respaldando la viabilidad y pertinencia de construir este prototipo en la Universidad Metropolitana.

Palabras clave: energía renovable, sistemas de almacenamiento, electroquímica, optimización de baterías, simulación, control automático.

Abstract

Vanadium redox flow batteries (VRFB) are promising alternatives to mitigate the intermittency of renewable energy-based grids, although they require further studies and optimization. This work presents the theoretical design of a single-cell VRFB laboratory-scale prototype with an electrolyte recirculation system and a variable measurement system intended for use as an educational tool at the Universidad Metropolitana. The most critical design criteria were identified through documentary research, defining the characteristics the design needed to meet. The designed cell includes serpentine flow channels, copper and graphite current collectors, graphite felt



Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0





Editado por / Edited by: Sebastián Ponce

Recibido / Received: 22/08/2024

Aceptado / Accepted: 31/10/2024

Publicado en línea / Published online: 08/05/2025

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v17i1.3423



electrodes, and an ion exchange membrane. The system incorporates two peristaltic pumps and sensors for current, voltage, conductivity, temperature, and electrolyte level, all connected to an Arduino UNO. The design allows for three configurations with different electrode sizes (6, 12, and 24 cm^2) and electrolyte volume, concentration, and flow rate variations. It was concluded that $VOSO_4$ is the optimal vanadium source due to its high solubility. The monitoring and control system, implemented with Arduino, enables accurate real-time measurements, facilitating data collection. The estimated cost of the prototype is 1025 USD, and it is recommended that conductivity sensors be included due to their importance in assessing the state of charge (SoC). The theoretical results obtained through MATLAB simulation are consistent with expectations, supporting the feasibility and relevance of building this prototype at Universidad Metropolitana.

Keywords: renewable energy, storage systems, electrochemistry, battery optimization, simulation, automatic control.

INTRODUCCIÓN

En el contexto global actual, la dependencia de los hidrocarburos expone a las naciones a la volatilidad de los precios del petróleo y contribuye al aumento de la contaminación [1]. Las energías renovables ofrecen una alternativa prometedora. Los sistemas de generación basados en fuentes renovables han experimentado un crecimiento significativo [2]; sin embargo, su principal desafío es la intermitencia y la imprevisibilidad de sus fuentes [2]. Los sistemas de almacenamiento energético permiten maximizar el aprovechamiento de estas fuentes durante los periodos de mayor generación [2]. Entre los distintos tipos de acumuladores de energía, las baterías de flujo redox de vanadio (BFRV) destacan por su eficiencia y fiabilidad [3, 4]. Para consolidar las energías alternativas en el esquema energético global, es fundamental continuar investigando el desempeño de estos acumuladores [3]. Este trabajo presenta el diseño detallado de un prototipo experimental de batería de flujo de vanadio, destinado a su futura implementación en la Universidad Metropolitana, respondiendo a la pregunta: ¿cuáles son las características de un prototipo funcional de BFRV a escala de laboratorio que sea viable construir en la Universidad Metropolitana?

Las baterías de flujo redox de vanadio (BFRV) son ampliamente estudiadas a nivel global, con diversos enfoques y escalas, con el fin de mejorar su eficiencia y comprender mejor su funcionamiento. La mayoría de las investigaciones comienzan a escala de laboratorio, aumentando la escala de los sistemas a partir de los resultados obtenidos. Un ejemplo de esto es el trabajo de López y Poma [5], quien desarrolló un prototipo de laboratorio y propuso estrategias de escalamiento. Patiño [2], por su parte, construyó un prototipo capaz de suministrar 4 W y detalló su instalación en el laboratorio. Otros estudios específicos, como el de Belmonte y Grespan [6], se enfocan en el desarrollo de membranas, mientras que Patiño [2] utilizó espectrofotometría UV-Visible para medir la concentración de iones en los electrolitos.



Schofield y Musilek [7] demostraron la variación lineal de la conductividad en función del estado de carga. Además, investigaciones sobre la densidad de corriente, concentración de ácido sulfúrico y sistemas de recirculación de electrolitos, como el análisis hidráulico de Ibáñez [8], también destacan en este campo. El control y la medición de datos, junto con simulaciones teóricas, son fundamentales, como lo ejemplifica el modelo de Al-Yasiri [9] y el sistema de control propuesto por López y Poma [5]. El costo de construcción representa otro desafío, abordado por Ghirlanda [10] y analizado económicamente por Ibáñez [8]. En este contexto, la investigación en la Universidad Metropolitana se suma a estos esfuerzos: Perdomo [11] resalta la eficiencia de las BFRV, Belmonte y Grespan [6] se enfocan en las membranas, y Sanoja [12] evalúa exhaustivamente los componentes y estrategias para su optimización. Este trabajo contribuye a la continuidad de la investigación en BFRV en la Universidad Metropolitana, Caracas, Venezuela.

MARCO TEÓRICO

Principio de funcionamiento

La celda electroquímica es la unidad básica de los sistemas de almacenamiento de energía [10]. Estas celdas están compuestas por dos electrodos, un medio electrolítico y una membrana separadora que permite el flujo iónico. Las baterías de flujo son sistemas electroquímicos recargables que acumulan energía en el electrolito que fluye a través de ellas [13]. Los electrolitos son almacenados en tanques externos, uno para el anolito y otro para el catolito. Cuando el electrolito abandona la celda, contiene iones con diferentes estados de oxidación debido a las reacciones redox.

Dentro de las baterías de flujo se encuentran las baterías de flujo redox de vanadio (BFRV). Una de las ventajas que tienen las BFRV frente a otros diseños es que utilizan el mismo electrolito para ambas semiceldas, minimizando la contaminación entre especies y aumentando la vida útil de la batería [13]. Este mecanismo se fundamenta en los cuatro estados de oxidación del vanadio: V^{2+}, V^{3+}, V^{4+} y V^{5+}; particularmente, cada uno de ellos tiene un color diferente [10] (Fig. 1).

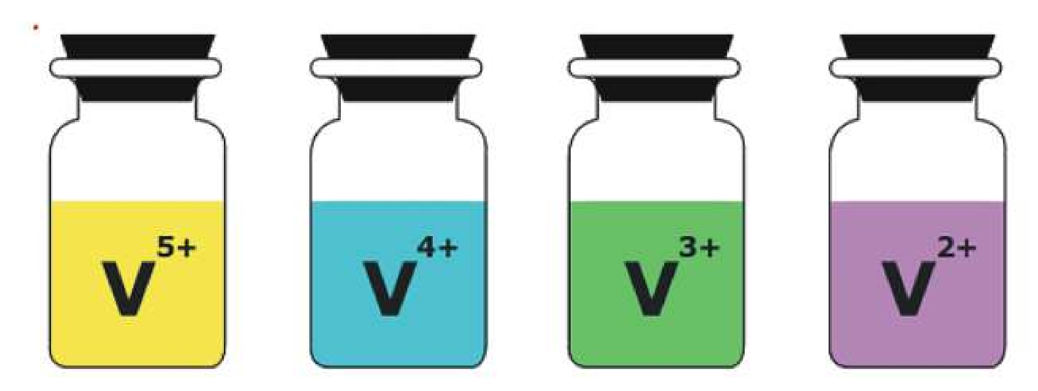


Figura 1. Estados de oxidación del vanadio y sus colores.

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v17i1.3423



Las reacciones químicas que describen el funcionamiento de las BFRV son:

Ánodo

$$V^{2+} \leftrightharpoons V^{3+} + e^- \qquad E^0 = -1{,}004\,V \tag{1}$$

Cátodo

$$VO_2^+ + 2H^+ + e^- \leftrightharpoons VO^{2+} + H_2O \qquad E^0 = -0{,}255\,V \tag{2}$$

Reacción total

$$V^{2+} + VO_2^+ + 2H^+ \leftrightharpoons V^{3+} + VO^{2+} + H_2O \qquad E^0 = -1{,}259\,V \tag{3}$$

Para efectos de este trabajo, se referirá a las especies VO_2^+ y VO^{2+} como V^{5+} y V^{4+}, respectivamente, por los estados de oxidación del vanadio involucrados en cada uno. Para los iones restantes, se mantiene la notación V^{2+} y V^{3+}.

En las BFRV, las reacciones son reversibles; en esto se basan los procesos de carga y descarga. Cuando la batería recibe energía, los electrones van del cátodo al ánodo, es decir, el V^{3+} se reduce para ser V^{2+} en el anolito y el V^{4+} se oxida para ser V^{5+} en el catolito. Cuando la batería entrega energía (descarga), el sentido de las reacciones se invierte, al igual que las condiciones de oxidación y reducción, para que los electrones vayan del ánodo al cátodo (Fig. 2).

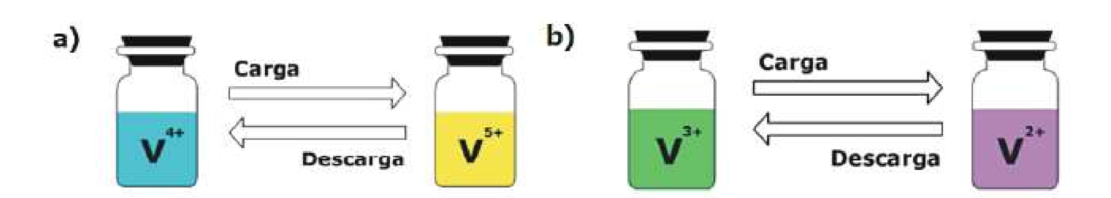


Figura 2. Cambio del electrolito en semiceldas (a) Positiva y (b) Negativa.

Cuando la batería está en funcionamiento, los electrolitos son bombeados estequiométricamente desde sus reservorios hacia la celda. Cada uno entra en contacto con su respectivo electrodo y ocurren las reacciones redox (sea de carga o descarga) en la superficie de cada electrodo (Fig. 3). Posteriormente, los electrolitos salen de la celda hacia sus reservorios correspondientes; las únicas interacciones entre anolito y catolito son el intercambio protónico a través de la membrana y el intercambio de electrones a través de los colectores de corriente, para que los electrolitos se mantengan eléctricamente neutros [10].

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v17i1.3423



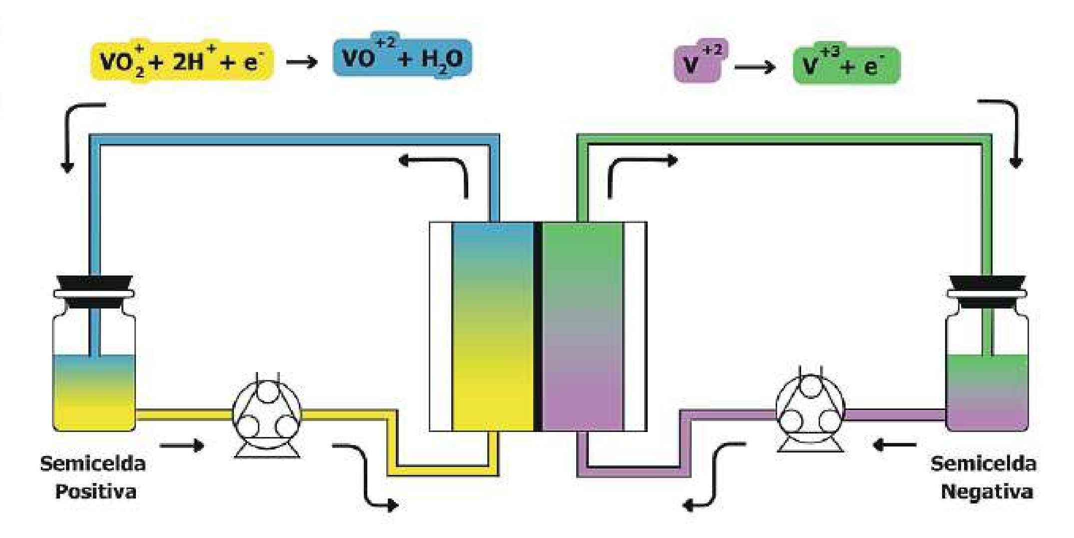


Figura 3. Diagrama de funcionamiento de la BFRV en el proceso de descarga. [10].

Variables influyentes

La conversión de iones de vanadio en las semiceldas ocurre hasta que la batería alcanza su estado de carga deseado. El estado de carga (SoC por sus siglas en inglés *State of Charge*) es la relación entre la energía almacenada en un momento dado y la máxima energía que es capaz de contener [10]. Para el proceso de carga, donde el V^{3+} se reduce a V^{2+} en el anolito y el V^{4+} se oxida a V^{5+} en el catolito, partiendo de la suposición de que ambos almacenan la misma cantidad de energía en un mismo momento, el estado de carga se rige por la siguiente ecuación [14]:

$$SoC = \left(\frac{C_{V^{2+}}}{C_{V\ total}}\right) = \left(\frac{C_{V^{5+}}}{C_{V\ total}}\right) \quad (4)$$

SoC representa el estado de carga (%), $C_{V^{2+}}$ y $C_{V^{5+}}$ es la concentración de iones V^{2+} y V^{5+} en sus electrolitos correspondientes (M) y $C_{V_{total}}$ es la concentración inicial de vanadio (M). Cuando todos los iones ya se encuentran en estos estados de oxidación, la batería está cargada completamente y su SoC es 100 %.

En este tipo de sistemas, la potencia que pueden entregar y su capacidad para almacenar energía son independientes entre sí; por lo que son sistemas altamente escalables [15].

La potencia depende de la diferencia de potencial y la corriente de salida de la batería, que a su vez varían en función de otros factores. En su caso, la tensión o voltaje de circuito abierto (OCV por sus siglas en inglés, *Open Circuit Voltage*) de cada celda de la batería se define por la ecuación de Nernst aproximada, utilizando concentraciones molares en vez de los coeficientes de actividad [16].

$$V_{celda} = V^0 + \frac{RT}{F_1} ln\ ln \left(\frac{|C_{V^{2+}}||C_{V^{5+}}|}{|C_{V^{3+}}||C_{V^{4+}}|}\right) \quad (5)$$

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v17i1.3423



Donde V_{celda} es la diferencia de potencial a la salida de cada celda (V), V^0 es el potencial estándar, para estas reacciones es 1,26 V [17], como puede verse en las ecuaciones 1, 2 y 3, R es la constante universal de los gases (J/molK), T es la temperatura (K), F_1 es la constante de Faraday (96485,33 C/mol) y C_i es la concentración de cada uno de los iones de vanadio (M). La diferencia de potencial a la salida de la batería se obtiene al multiplicar este V_{celda} por el número de celdas en el arreglo. Esta ecuación se aplica a la reacción final del proceso.

$$V^{2+} + VO_2^+ + 2H^+ \leftrightharpoons \; V^{3+} + VO^{2+} + H_2O \qquad V^{2+} = -1{,}259V1 \tag{6}$$

Otro método para obtener la diferencia de potencial es a partir de la ecuación de Nernst modificada, en función del estado de carga de la batería. Han et al. [14] reportaron que este método de estimación tiene un error del 5 % al 7 %, por lo que se considera confiable.

$$V_{celda} = V^0 + \frac{RT}{nF_1} ln\, ln \left(\frac{SoC}{(1-SoC)}\right)^2 \tag{7}$$

La corriente que fluye a través de la batería depende del modo de operación en el que se encuentre: durante el proceso de carga, la corriente proviene de la fuente de energía a la que está conectada la batería, mientras que, durante la descarga, la corriente proviene del flujo de electrones generado por las reacciones redox [17].

En cambio, la capacidad de almacenamiento energético depende de la concentración inicial de vanadio en los electrolitos y el volumen de estos; esta relación está definida por las siguientes ecuaciones [8]:

$$\rho_{energia} = \frac{V_{celsa}.F_1.(SoC_{max} - Soc_{min}).C_{Vtotal}}{3600} \tag{8}$$

$$E_{celda} = \frac{Vol_{electrolito}}{\rho_{energia}} \tag{9}$$

Donde $\rho_{energia}$ es la densidad energética (Wh/L) y SoC_{max} y Soc_{min} son los estados de carga máximo y mínimo de operación, respectivamente. E_{celda} es la capacidad de almacenamiento energético (Wh) y $Vol_{electrolito}$ es el volumen de electrolito necesario en cada semicelda (L).

El anolito y el catolito tienen la misma composición, por lo que la contaminación cruzada a través de la membrana se considera despreciable [18]. Ambas soluciones se preparan a partir de especies de vanadio disueltas en medio ácido, normalmente ácido sulfúrico (H_2SO_4), y se les pueden agregar sustancias para mejorar su eficiencia, solubilidad y conductividad, como ácido clorhídrico (HCl) o ácido fosfórico (H_3PO_4) [8]. Las dos principales fuentes de vanadio para los sistemas de BFRV son el sulfato de vanadilo ($VOSO_4$) y el pentóxido de vanadio (V_2O_5), cada uno con sus ventajas y desventajas [10].

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v17i1.3423



Otra variable importante del funcionamiento de las BFRV es la duración de sus ciclos de carga y descarga. Este es el tiempo que transcurre mientras la batería pasa de su SoC_{max} al SoC_{min} y viceversa, por lo que define el tiempo que podrá pasar la celda entregando energía [19]. Idealmente, el tiempo de carga es igual al de descarga y viene dado por López y Poma [5].

$$t_d = \frac{F_2.(C_{v\,total}\,.\,SoC_{max}).Vol_{electrolito}}{I} \qquad (10)$$

Donde t_d es el tiempo de carga y descarga (h), F_2 es la constante de Faraday (26,801 Ah/mol) e I es la corriente que circula por la batería (A).

Por otra parte, la circulación de electrolitos a lo largo de la BFRV es esencial. Este flujo debe ser uniforme, porque de esto depende tener una densidad de corriente constante en toda la celda [20]. Existen dos configuraciones principales para el flujo de los electrolitos, descritos por Kim [20]. (Ver Fig. 4).

- **Flujo a través o *flow-through*:** el electrolito fluye a través del electrodo poroso. La entrada de electrolito va directamente al electrodo y lo atraviesa sin un camino definido hasta llegar a la salida.

- **Flujo por superficie o *flow-by*:** el electrolito fluye a través de un canal definido y el electrodo se coloca de modo que su superficie quede en contacto con este canal de flujo; así el electrolito penetra parcialmente el electrodo para reaccionar, mientras circula por el conducto hasta salir de la celda.

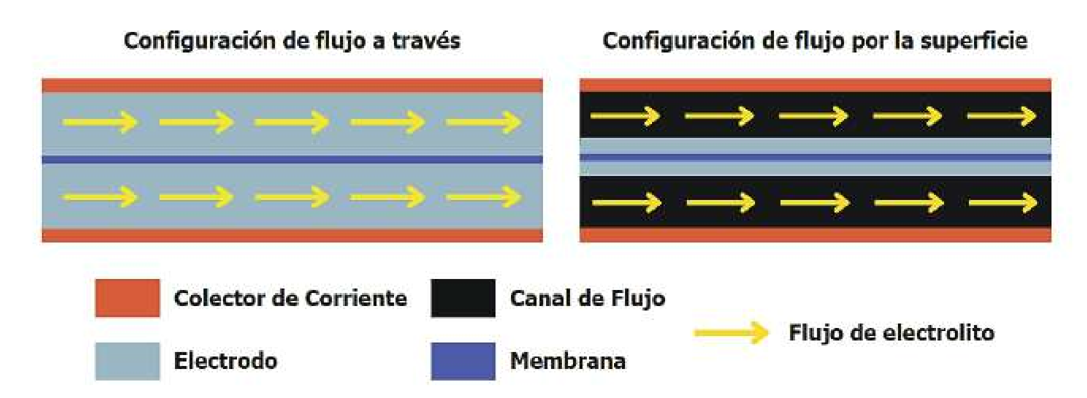


Figura 4. Configuraciones de flujo a través y por la superficie [20].

Los canales de flujo utilizados en el diseño *flow-by* tienen varias geometrías, entre las que resaltan (Ver Fig. 5):

- **Flujo en serpentín:** tiene una forma continua; la entrada y la salida del electrolito se conectan directamente por un canal en forma de serpentín [21].

- **Flujo interdigitado:** este diseño utiliza múltiples canales independientes (no interconectados), organizados en paralelo, con canales de entrada y salida de electrolito alternados y cerrados en uno de sus extremos [22]. El electrolito fluye desde los canales de entrada, se desplaza hacia el electrodo (donde ocurre la reacción química) y luego se redirige hacia los canales de salida. Sin embargo, este

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v17i1.3423



proceso no permite un control preciso: el electrolito siempre tiende a tomar el canal de salida más cercano, evitando retroceder hacia los de entrada. Esto se debe a que los canales de entrada están permanentemente saturados con electrolito fresco, lo que genera una presión hidrodinámica que bloquea el flujo inverso.

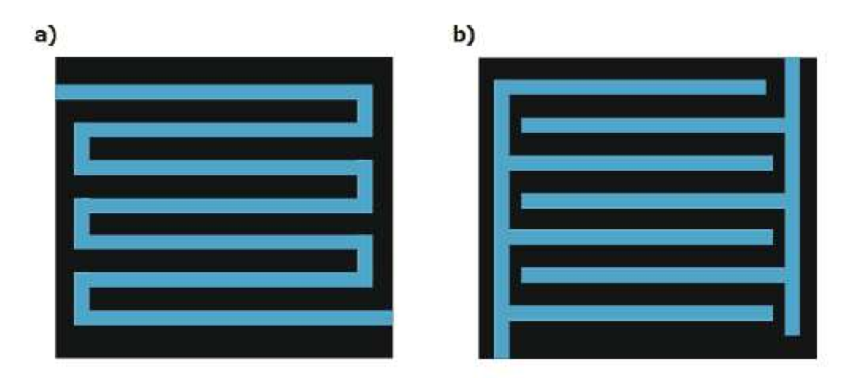


Figura 5. Canales de flujo (a) en serpentín y (b) interdigitado. [21, 22].

La magnitud de este flujo se calcula siguiendo la Ley de Faraday de la electrólisis [23], adaptada al sistema de batería de flujo, donde el caudal es constante.

$$Q_{teórico} = \frac{I \, . \, N_{celdas}}{n \, . \, F \, . \, C_V \, . \, SoC_{min}} \tag{11}$$

En esta ecuación $Q_{teórico}$ es el caudal mínimo de operación, (L/s), N_{celdas} es el número de celdas en el arreglo y es el número de electrones transferidos (1 e^-).

Este caudal es el mínimo que se debe aplicar a la celda bajo esas condiciones; sin embargo, no considera las pérdidas de presión, ni la absorción de electrolito que ocurre en los electrodos [4]. Estos factores dificultan el transporte de los iones a través de la celda, disminuyendo la eficiencia de la batería. Es por esto por lo que el caudal teórico se multiplica por un factor de escalamiento llamado lambda (λ) para obtener un caudal real, capaz de contrarrestar estos efectos y mantener un flujo constante. Para las BFRV, λ está entre 4 y 8 [8]. A mayor λ, mejor es el aprovechamiento de los electrolitos [20].

$$Q_{real} = \lambda \, . \, Q_{teórico} \tag{12}$$

En las BFRV, este fluido se almacena fuera de la celda y existen dos configuraciones en cuanto a su circulación [8]:

- **Con recirculación:** necesita dos reservorios de electrolito, uno para cada semicelda. Los electrolitos salen del tanque y son bombeados hacia la celda, donde reaccionan con su electrodo correspondiente, luego salen de la celda y regresan a su reservorio inicial. Este proceso continúa hasta que la batería alcanza el nivel de carga deseado.
- **Sin recirculación:** necesita 4 tanques de electrolito, dos para cada semicelda. El electrolito sale del tanque inicial hacia la celda y una vez ocurridas las reacciones,

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v17i1.3423



sale hacia su tanque final; no se mezcla con el electrolito que no ha reaccionado. El nivel del tanque inicial disminuirá y el del tanque final aumentará conforme se carga o descarga la batería.

La relación entre el comportamiento ideal calculado y el realmente entregado por la batería en condiciones experimentales es la eficiencia. En las BFRV existen diferentes tipos de eficiencia [3], las cuales se presentan a continuación.

Tabla 1. Eficiencias de las BFRV.

Eficiencia	Ecuación	Variables
Eficiencia en voltaje	$\eta_V = \frac{V_d}{V_c}$ (13)	V_d es el voltaje de descarga V_c es el voltaje de carga
Eficiencia de carga	$\eta_c = \frac{Q_d}{QV_c}$ (14)	Q_d es la carga eléctrica total de descarga Q_c es la carga eléctrica total de carga
Eficiencia en energía	$\eta_E = \frac{E_d}{E_c}$ (15)	E_d energía en el proceso de descarga E_c energía en el proceso de carga
Eficiencia en potencia	$\eta_p = \frac{P_d}{P_c}$ (16)	P_d potencia entregada en descarga P_c potencia recibida en carga

No solo se deben tomar en cuenta las ecuaciones que rigen el funcionamiento de la batería, sino también los fenómenos electroquímicos que perjudican su rendimiento y alejan su comportamiento de la idealidad [4].

- **Pérdidas de presión:** se dan por el cambio de la sección de flujo entre las tuberías y el electrodo [24]. El área del canal de flujo es más pequeña que la del electrodo, por lo que el fluido pierde fuerza en su desplazamiento. Esto afecta la eficiencia de la batería, porque la bomba debe trabajar más para contrarrestarlo.

- **Resistencia del electrolito:** ocurre por la interacción entre los iones disueltos en el electrolito [4]; como todos tienen cargas positivas, se repelen entre sí y obstaculizan su movimiento hacia la membrana. A mayor resistencia, menor diferencia de potencial, por lo que disminuye la eficiencia de la batería.

- **Polarización de la concentración:** se refiere al gradiente de concentración que existe en el electrolito durante las reacciones; la concentración de iones que cambiaron su estado de oxidación será mayor cerca del electrodo, y menor a medida que el electrolito llega a los tanques de reserva [4]. Esto ocurre gracias a la diferencia entre la velocidad de reacción y la velocidad de flujo del electrolito [14]. Esto es perjudicial porque ocasiona un desbalance dentro de la celda.

- **Oxidación del anolito:** el ion V^{2+} tiende a oxidarse rápidamente en presencia de aire, lo que disminuye su concentración y altera la composición del anolito, ocasionando un desbalance de la celda [24].



- **Impacto del medio ácido:** como los electrolitos utilizados en este tipo de sistemas son de carácter ácido, se deben utilizar materiales resistentes ante estas condiciones para evitar la corrosión y el deterioro en los tanques, tuberías y cualquier otro componente que se encuentre en contacto directo con los electrolitos [4].

Todos estos fenómenos contribuyen a la pérdida de energía dentro de la batería por efectos internos, llamada autodescarga. Estos procesos son inherentes al funcionamiento de las BFRV, por lo que se pueden tomar precauciones en el diseño para poder minimizar sus efectos [4].

METODOLOGÍA

El marco metodológico de este trabajo se estructuró en varias fases. Primero, se realizó una investigación documental, revisando tesis y artículos científicos para establecer una base teórica sólida, enfocada en el diseño de baterías de flujo redox de vanadio (BFRV) como herramienta práctica. La investigación es descriptiva, ya que detalla los criterios de diseño, componentes y condiciones de operación, con un enfoque cuantitativo basado en mediciones empíricas en laboratorio. Tiene un propósito aplicado, orientado a resolver problemas concretos en el diseño de prototipos de baterías, con impacto en la sociedad y la industria. Se recopilaron datos de fuentes primarias y secundarias, y se realizaron análisis cualitativos y cuantitativos para evaluar tecnologías y enfoques actuales. La investigación exploratoria permitió identificar nuevas áreas de oportunidad en el diseño de BFRV.

Criterios de diseño y variables de estudio

Se identificaron las magnitudes físicas y químicas de interés para estudiar la batería, categorizadas en variables a controlar, a medir y a calcular.

Para el diseño de la batería, se establecieron las siguientes suposiciones:

- Las únicas reacciones que se llevan a cabo en el sistema son las redox que rigen el funcionamiento de la batería. Las reacciones secundarias, como la evolución de hidrógeno y oxígeno y la hidrólisis del V^{4+}, se consideran despreciables [10]. Tampoco se consideran los coeficientes de transferencia de masa ni las cinéticas de las reacciones, asumiendo un comportamiento ideal y completo [25].

- El fluido es incompresible, diluido y de concentración uniforme [15].

- Las características de la membrana y de los electrodos son isotrópicas [26].

- La membrana está completamente en contacto con el electrolito y solo permite el paso de protones. La contaminación entre electrolitos se considera despreciable en el modelo de cálculo [15].

- Es una celda balanceada; el estado de carga en ambos reservorios es igual en todo momento [27].

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v17i1.3423



- El efecto del calor generado por las reacciones en la celda es despreciable al considerar la temperatura de la batería [24].

En función de estas condiciones, los criterios identificados y la comparación de 12 prototipos propuestos en la literatura con aplicaciones similares a las de este trabajo, se determinaron las características del prototipo diseñado.

Diseño y dimensionamiento de la batería

Se determinaron los materiales y dimensiones del prototipo en función de los valores utilizados en diferentes prototipos de la literatura, seleccionando las opciones más apropiadas. Se priorizó el contexto académico y se favorecieron los materiales transparentes para analizar los estados de oxidación del vanadio. Los sensores fueron seleccionados en función de las variables de estudio especificadas y los rangos operativos característicos en sistemas BFRV a escala de laboratorio.

Propuesta y simulación del sistema de control

Se aplicó la nomenclatura del Estándar Nacional Americano (ANSI/ISA-5.1-2024) para elaborar el diagrama P&ID del sistema, detallando la ubicación de sensores y actuadores en relación con el dispositivo controlador. La elección del controlador se basó en el número total de entradas y salidas digitales y analógicas requeridas, seleccionando un dispositivo con capacidades superiores para futuras expansiones. El circuito propuesto se diseñó con Fritzing (Fritzing GmbH), un programa de diseño electrónico y creación de prototipos de código abierto. La simulación de la BFRV se ejecutó en MATLAB® (The MathWorks, Inc.) mediante un modelo desarrollado a partir de ecuaciones fundamentadas en investigaciones previas, ajustado a los rangos específicos del prototipo. Se incorporaron gráficos para analizar el comportamiento de las variables en función de sus variaciones.

Diseño del prototipo

El modelo de cada pieza de la celda, así como el montaje completo, se realizó en el programa Fusion 360® (Autodesk, Inc.), tomando como base la configuración y dimensiones previamente establecidas. En el modelo se especifican el material y las dimensiones de cada componente.

Criterios de diseño

Los criterios considerados, así como las especificaciones para el prototipo de BFRV diseñado, se describen en la tabla 2.

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v17i1.3423



Tabla 2. Criterios fundamentales para el diseño de una BFRV.

	Criterios	Especificación
Electroquímicos	Número de celdas en el arreglo	1
	Área de los electrodos (cm^2)	6 - 12 - 24
	Tipo de membrana iónica	NR212
	Rango del estado de carga	20 a 95 %
	Composición del electrolito	$VOSO_4$ 0,5 a 2 M H_2SO_4 3 M
	Volumen del electrolito (mL)	50 a 250
Mecánicos	Tipo de flujo del electrolito	Flujo "en superficie" en serpentín
	Presencia de sistema de recirculación	Sí

Los criterios electroquímicos se enfocan en garantizar que las reacciones redox alcancen un rendimiento óptimo según la aplicación de la batería. Para ello, se analizó el número de celdas en función de la diferencia de potencial requerida en el sistema [28]. Dado que el prototipo debe satisfacer una demanda específica, se decidió implementar una única celda.

El segundo criterio fue el área de los electrodos, los cuales representan los sitios activos de la BFRV. Tiene un impacto directo sobre la forma en la que la batería se comporta frente a la corriente eléctrica que recibe o entrega [29], a través de la densidad de corriente que experimenta la batería. Se propuso el uso de tres tamaños de electrodos diferentes: 6 cm^2, 12 cm^2 y 24 cm^2 con la intención de estudiar el efecto de la variación del área de los electrodos en el funcionamiento de la celda. Estos tres tamaños se mantienen en los rangos utilizados en las investigaciones realizadas y permiten estudiar qué ocurre al duplicar o reducir a la mitad el área de los electrodos.

En cuanto al tipo de membrana iónica, se consideró la propuesta de Belmonte y Grespan [6]: la membrana NR212 de la marca Nafion® [30], ya que es la que mejor cumple con los parámetros establecidos para prototipos a escala de laboratorio, destacando por su alta selectividad iónica y su mayor accesibilidad económica.

Como fue definido anteriormente, el SoC va desde el 0 % (completamente descargada) hasta el 100 % (completamente cargada) en un comportamiento ideal. Sin embargo, la autodescarga y los demás fenómenos perjudiciales hacen que su comportamiento se aleje de la idealidad. Por lo tanto, se establece un rango de operación del SoC, en el cual se sepa que los resultados obtenidos son confiables y se preserve la integridad de los electrolitos [2]. Schofield y Musilek [17] aseguran que la estimación a partir del OCV es confiable hasta el estado de carga 20 %. A valores menores, el comportamiento del OCV puede ser fluctuante y la medición no sería fiable. El límite máximo se suele fijar en 80 %, pero en montajes experimentales se ha extendido hasta el 95 % [13]. Cargar la batería al 100 % puede aumentar los efectos de la polarización de la concentración, por lo que no es recomendado [14]. En resumen, se fija el límite mínimo del SoC al 20 % y el máximo al 95 %, con la posibilidad de cortarlo en 80 % u otro valor, según el montaje experimental.

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v17i1.3423



Otro de los parámetros fue la composición del electrolito a utilizar, partiendo de la fuente de vanadio, sea V_2O_5 o $VOSO_4$. Para Lourenssen [31], la decisión radicó en la importancia de variar la concentración de vanadio en los electrolitos para la aplicación de la BFRV. Si se quiere mantener una concentración fija, es mejor utilizar V_2O_5 por su menor costo, pero si se quieren utilizar diferentes concentraciones de vanadio en la celda, es mejor utilizar $VOSO_4$ por su mayor solubilidad en H_2SO_4, que es el electrolito de apoyo por excelencia en estos sistemas [32]. Dada la aplicación académica que tendrá el prototipo, cambiar la concentración es un requerimiento importante, por lo que se propuso el uso de $VOSO_4$ como fuente de vanadio para los electrolitos.

No se estableció una concentración fija; en su lugar, se definió un rango de 0,5 a 2 M, basado en investigaciones previas, con el fin de analizar su efecto en el comportamiento de la batería. La concentración de ácido sulfúrico se fijó en 3 M, ya que es la más utilizada con estas concentraciones de vanadio. No obstante, esta concentración puede modificarse según las condiciones del montaje.

El ion SO_4^{2-}, presente tanto en el $VOSO_4$ como en el ácido, puede disminuir la solubilidad del vanadilo si la concentración de ácido aumenta excesivamente en relación con la del sulfato de vanadilo, comprometiendo así la eficiencia de la batería [33].

Asimismo, pueden añadirse otros aditivos como el HCl, el H_3PO_4 u otras sustancias que puedan tener impactos positivos en el comportamiento de la celda, ya sea incrementando la conductividad del electrolito o aumentando su estabilidad a altas temperaturas [34], dependiendo de los objetivos del investigador y el diseño experimental.

Cabe destacar que esta mezcla es altamente corrosiva, por lo que los materiales a utilizar en las piezas de la celda que entren en contacto con el electrolito deben ser resistentes ante estas características.

Se eligió un rango de volúmenes de operación entre 50 y 250 mL de electrolito en cada tanque, para así tener un amplio rango de acción y poder realizar variaciones significativas en los montajes experimentales sin necesidad de cambiar los tanques de reserva de electrolito. La mayoría de los volúmenes utilizados en las investigaciones de referencia se encuentran en este rango, por lo que se considera acertado.

Por otra parte, los criterios mecánicos se relacionan con el sistema hidráulico de la batería y sus especificaciones. Para el tipo de flujo se consideraron las opciones de flujo a través (*flow-through* o FT) o flujo por la superficie (*flow-by*, o FB). Si bien la configuración FT presenta menos pérdidas de presión, la FB permite usar electrodos más delgados, por lo que genera menos pérdidas óhmicas y permiten una mejor transferencia de masa [20]. Además, el FB puede mitigar los efectos de la polarización de la concentración [4], a diferencia del FT. Por esto, se seleccionó utilizar una configuración FB.

El canal de flujo se propuso en la configuración de serpentín, dado que tiene mejores resultados en las celdas a escala de laboratorio, al disminuir en mayor medida los efectos de la resistencia del electrolito [4]. Además, este diseño incrementa la transferencia de masa a lo largo del electrodo, al poder distribuir mejor el electrolito [35]. Si bien se sabe que este tipo de placas implican mayores pérdidas de presión de bombeo, estas se mitigan al calcular el caudal real de la batería.

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v17i1.3423



Para este diseño se implementará el modelo con recirculación, permitiendo que el electrolito pueda pasar más de una vez por los electrodos y asegurar que todos sus iones reaccionen según el proceso que se lleva a cabo en la batería (carga o descarga). Si bien el modelo sin recirculación permite que el nivel de cada tanque se utilice para estimar visualmente el SoC de la batería [2], se considera poco eficiente, ya que implica mayores costos, disponibilidad de espacio [31] y no se aprovecha todo el potencial del electrolito porque solo pasa por los electrodos una vez.

Variables de estudio

Las variables de estudio más relevantes de las BFRV se categorizaron de la siguiente forma:

Tabla 3. Variables importantes en el sistema.

Variables relevantes del proceso		
Medibles	**Controlables**	**Calculables**
Conductividad	Temperatura	Concentración
Tensión	Caudal de electrolito	Estado de carga
Corriente de salida Tiempo de carga y descarga	Nivel de electrolito en los tanques	Eficiencia

Tabla 4. Rangos de operación de las variables más importantes

Variable	Rango de Operación
Conductividad	200 a 900 mS/cm
Tensión	0 a 1,7 V
Corriente	0 a 3 A
Temperatura	10 a 40 °C
Caudal de electrolito	2 a 100 mL/min
Nivel de electrolito en los tanques	Nivel bajo: 50 mL
Concentración total de vanadio	0,5 a 2 M
Concentración de H_2SO_4	3 M
Estado de carga	20 % a 95 %

Variables medibles

La conductividad, esencial en el estudio de BFRV, varía entre 200 y 500 mS/cm en electrolitos de vanadio, llegando a 900 mS/cm con cambios en la concentración de H_2SO_4 y vanadio [4]. Una mayor conductividad mejora la eficiencia de la celda al reducir

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v17i1.3423



la resistencia. Puede usarse como variable experimental para estimar el SoC, ya que varía linealmente durante carga/descarga [7]. La tensión y corriente directamente determinan la potencia de salida, caudal, tiempo de carga/descarga y estado de carga. La diferencia de potencial en BFRV oscila de 0 V (descargada) a 1,7 V [14]. Para el diseño propuesto, se sugiere corriente directa de 0 a 3 amperios. El tiempo de carga/descarga, medible empíricamente, sirve como parámetro de referencia al observar el tiempo que tarda en alcanzar su máximo y mínimo voltaje.

Variables controlables

La temperatura es crucial para controlar en las BFRV debido a su impacto en la solubilidad de las especies de vanadio en el H_2SO_4 [2]. Por debajo de 10 °C, los iones V^{2+}, V3+ y V^{4+} reaccionan y precipitan, mientras que, por encima de 40 °C, el V^{5+} precipita [36]. Una vez se inicia el proceso de precipitación, continúa hasta alcanzar el equilibrio [36], por lo que es crucial controlar la temperatura para evitar llegar a ese punto y preservar la integridad de los electrolitos. El caudal, como se mencionó previamente, minimiza impactos negativos como pérdidas de presión y polarización de concentración y carga en el electrolito, manteniendo la distribución homogénea de los iones [2]. Controlar y ajustar en tiempo real el caudal según el rendimiento de la celda es de interés académico. Se establece un rango de caudales de operación entre 2 y 100 mL/min, considerando un factor de escalamiento entre 6 y 8, ajustable según las preferencias del usuario y el diseño. En un sistema de recirculación cerrado con caudal constante, el nivel de electrolitos debería ser constante. No obstante, se debe monitorear para detectar fugas y pérdidas de presión. Un nivel superior al esperado indica insuficiente bombeo del electrolito.

Variables calculables

La concentración de iones de vanadio en electrolitos es vital para entender el funcionamiento de BFRV, pero medirla resulta complejo y la espectrofotometría fue descartada según Patiño [2]. No se encontró otro método confiable para medirla sin perturbar el sistema, por lo que no se considera medible en el prototipo. En cambio, la concentración puede estimarse a partir del estado de carga de la batería, calculado mediante el voltaje de circuito abierto según Han et al. [14]. Otro método es la estimación del SoC a través de la conductividad [7] o cualitativamente mediante el cambio de color de los electrolitos [24]. Se considera el cálculo de la eficiencia de la batería, comparando valores teóricos y experimentales al construir el prototipo. Calcular diferentes eficiencias permite analizar el rendimiento y realizar ajustes para optimizarlo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Piezas y componentes del prototipo

En función de la investigación documental realizada, se muestran los componentes del sistema completo de BFRV, con sus respectivas dimensiones y materiales (tablas 5 y 6).

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v17i1.3423



Tabla 5. Materiales y modelos de los componentes del prototipo.

Componente	Material / Modelo
Electrodos	Fieltro de carbono
Marcos de los electrodos	Goma Viton
Colectores de corriente	Láminas de cobre y grafito flexible
Canales de flujo	Placas de grafito
Placas terminales	Acrílico
Tanques de electrolito	Vidrio
Bombas	Peristálticas
Tuberías	Silicona

Tabla 6. Dimensiones de las piezas de la celda según los tres tamaños de electrodos definidos.

	Dimensiones (cm)						
Área de electrodo (cm^2)	Membrana	Serpentín	Colector de cobre	Colector de grafito	Placa del serpentín	Marcos de electrodos	Placas terminales
6	2,5 x 3,5	2 x 3	2 x 3	2,5 x 3,5	8,5 x 10,5	8,5 x 10,5	8,5 x 10,5
12	3,5 x 4,5	3 x 4	3 x 4	3,5 x 4,5			
24	4,5 x 6,5	4 x 6	4 x 6	4,5 x 6,5			

Electrodos

Los electrodos en las BFRV deben tener alta conductividad eléctrica y ser porosos para maximizar el área activa y facilitar el flujo de electrolitos [8]. El fieltro de carbono es común debido a su adecuación a estas características y su economía. No obstante, el papel de carbono ha llamado la atención por su menor resistencia óhmica [35]. Se propone el uso de fieltro de carbono de 3,175 mm de grosor para este diseño, dentro del rango típico de 3 a 5 mm. El tamaño de los electrodos influye en las dimensiones de la membrana, colectores de corriente y canales de flujo. Se proponen tres tamaños adecuados, pero el sistema de recirculación y las placas externas son reutilizables para todos los tamaños de electrodos sin modificaciones.

Marcos para los electrodos

La compresión de electrodos tras el ensamblaje de la celda es crucial para reducir las pérdidas de presión [21]. Se utilizan marcos de grosor menores al del electrodo, donde el fieltro se coloca y se comprime al grosor del marco al apilar las piezas [24]. Los marcos

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v17i1.3423



permiten la utilización de papel de carbono, colocándolo dentro y apilándolo según el grosor deseado [37]. El diseño sigue el criterio de Becker y Turek [38] para lograr una compresión del 20 % en los electrodos, estableciendo un grosor de marco de 2,5 mm. Las dimensiones de los marcos se ajustan a cada área de electrodo propuesta. Se consideran dos materiales para los marcos: plástico (PTFE o Teflón®) y goma (silicona y Viton®). Se opta por el fluoroelastómero Viton debido a su resistencia a medios ácidos y capacidad para sellar sistemas y evitar fugas [39, 40]. (Fig. 6).

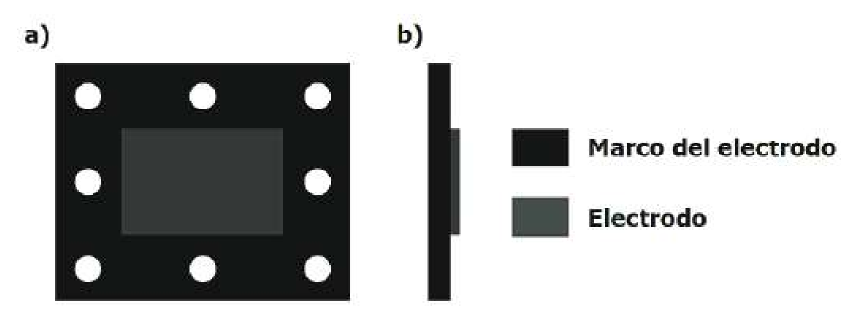


Figura 6. Relación entre los electrodos y sus marcos, vista frontal (a) y lateral (b).

Placas de flujo

Se sugiere el uso de bloques bipolares de grafito para construir los canales de flujo, en contraposición al policloruro de vinilo (PVC) utilizado por algunos investigadores [41], ya que la capacidad conductiva de los bloques de grafito facilita el flujo de electrones hacia los colectores de corriente [10]. El diseño del serpentín sigue el modelo de Zhong y Chu [24], con cada nivel del serpentín y canal de flujo teniendo un área transversal de 3 mm, coincidiendo con el diámetro interno de las tuberías. Cada canal de flujo dispone de dos boquillas para la entrada y salida del electrolito, y el área del serpentín se ajusta a la del electrodo, garantizando dimensiones uniformes en las tres configuraciones propuestas.

Colectores de corriente

Los colectores de corriente, conectores eléctricos de ambas semiceldas que facilitan el flujo de corriente, actúan como terminales celulares. La elección común es el cobre laminado, a menudo combinado con otro material (chapa de oro o grafito flexible) para reducir la resistencia de contacto con el bloque de grafito. Este diseño propone la combinación de láminas de cobre y grafito flexible, con este último colocado entre la lámina de cobre y el bloque bipolar de grafito de las placas de flujo [29]. El área de los colectores de cobre debe igualar la de los electrodos, mientras que la lámina de grafito debe tener un área ligeramente mayor. (Tabla 6).

Placas terminales / de extremo

Las placas terminales, esenciales para mantener todas las piezas presionadas entre sí mediante tornillos, deben ser resistentes al medio ácido de los electrolitos para prevenir fugas [5]. Este diseño opta por placas de extremo de polimetilmetacrilato, PMMA o Plexiglas® [42] en lugar de PVC utilizado en otros diseños eficientes, eligiendo Plexiglas

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v17i1.3423



por su transparencia [3]. Aunque las placas no entran en contacto con el electrolito en el montaje original, podrían usarse para pruebas focalizadas en el canal de flujo para observar el flujo del electrolito. Las dimensiones propuestas son de 105 mm x 15 mm x 85 mm (tabla 6).

Bombas

Las bombas peristálticas son idóneas para sistemas de recirculación de BFRV debido a su resistencia a medios ácidos, ya que el fluido no entra en contacto con el mecanismo de la bomba, sino solo con las tuberías [2]. Se sugiere el uso de dos bombas peristálticas EZO-PMP® de Atlas Scientific [43], una para cada semicelda. Con un rango de 0,5 mL/min a 105 mL/min, se cubre adecuadamente el espectro de operación requerido. Esta bomba ofrece alta precisión de bombeo (± 1 %) y diversos modos de operación, destacando la capacidad de bombeo con un caudal y tiempo definido por el usuario. Este último permite ajustar electrónicamente el flujo mediante un controlador, adaptándose así a cada configuración experimental.

Tuberías

Las conexiones del prototipo deben ser capaces de resistir medios ácidos corrosivos, por lo que se prefieren tuberías poliméricas como PVC o silicona para este tipo de instalaciones [2].

Se sugiere el uso de conexiones de silicona Atlas Scientific de 3 mm de diámetro interno, diseñadas para ser compatibles con la bomba seleccionada y aptas para entornos ácidos [44], considerándose la opción óptima.

Tanques / reservorios

Los tanques del sistema de recirculación deben ser resistentes a medios ácidos y herméticos para prevenir la oxidación del anolito al entrar en contacto con el aire [22]. Comúnmente, en BFRV a escala de laboratorio se emplean tanques de vidrio o polietileno, optándose por el vidrio para facilitar la observación del cambio de color en los electrolitos. Se busca una geometría cuadrada o rectangular para asegurar caras lisas y un adecuado funcionamiento del sensor de nivel, idealmente con escalas graduadas para medir visualmente el nivel de electrolito. Las tapas deben ser de un material resistente al medio ácido, como el polietileno, en caso de fuga. Se propone el uso de recipientes de vidrio de 250 mL con geometría rectangular y tapas de polietileno, permitiendo almacenar completamente el máximo volumen permitido por el diseño.

Sensores

En función de las variables medibles y controlables determinadas y sus rangos de operación (tablas 3 y 4), se seleccionaron los sensores necesarios (tabla 7); sus características se explican a continuación.

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v17i1.3423



Tabla 7. Sensores incluidos en el diseño del prototipo.

Variable	Sensor
Conductividad	Sensor de conductividad K10 Platino
Tensión	Sensor de tensión FZ0430
Corriente	Sensor de corriente ACS712
Tiempo de carga y descarga	Arduino
Temperatura	Sensor de temperatura LM335
Caudal de electrolito	Bomba peristáltica EZO-PMP
Nivel de electrolito en los tanques	Sensor de nivel sin contacto XKC-Y25-PNP

Sensor de conductividad

Es necesario utilizar un sensor de conductividad de amplio espectro que cubra el rango teórico de los electrolitos (Tabla 4) para medir diversas composiciones electrolíticas.

La medición no busca determinar directamente la concentración de iones en un momento dado, sino proporcionar una referencia para observar las variaciones en función del estado de carga de la batería, ya que un mayor estado de carga se correlaciona con una mayor conductividad [7]. El sensor de conductividad EZO® de Atlas Scientific, modelo K10 [45], fue seleccionado por su rango de medición de 10 µS/cm a 1 S/cm, lo que permite registrar variaciones significativas en la conductividad. Con una precisión del 2 % y resistencia a medios ácidos, se considera adecuado para este diseño. Se incluyó un sensor en cada tanque de electrolito para medir en tiempo real tanto el anolito como el catolito de manera independiente. A pesar de ser un instrumento costoso (226$ cada uno), se justifica su elección debido a su resistencia a medios ácidos y amplio rango de medición, lo que permite su utilización en diversos montajes experimentales y garantiza resultados más precisos y representativos.

Sensor de tensión y sensor de corriente

El sensor de tensión medirá la diferencia de potencial, mientras que el sensor de corriente se encargará de medir la corriente durante los procesos de carga y descarga.

Ambos estarán conectados a los colectores de corriente de cobre, los cuales no estarán en contacto con los electrolitos, evitando así la degradación en medio ácido. Se ha elegido el sensor FZ0430 para medir la diferencia de potencial, con un rango de 0.0245 V - 25 V y la sensibilidad necesaria para reportar valores de tensión de la batería, teóricamente entre 0 V y 1.7 V [17]. En cuanto al sensor de corriente, se opta por el ACS712

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v17i1.3423



de Allegro Microsystems [46], con un rango de 0 a 5 A. Tiene la sensibilidad y precisión suficientes (1,5 % a 25 °C) para registrar pequeños cambios en la corriente aplicada a la celda, que está limitada entre 0 y 3 A. Además, presenta una baja resistencia interna de 1,2 mΩ, lo que minimiza la pérdida de energía, y una rápida respuesta con un tiempo de subida de salida de 5 µs ante una corriente de entrada escalonada.

Tiempo de carga

El tiempo de carga y descarga puede medirse utilizando la función millis() en microcontroladores como Arduino® UNO [47], sin necesidad de un sensor independiente. Este método permite contar el tiempo que transcurre entre condiciones específicas, utilizando los voltajes teóricos de la batería en sus estados de carga máxima y mínima previamente establecidos. Se registra el tiempo transcurrido desde que la batería alcanza el voltaje mínimo hasta el máximo, o viceversa, proporcionando de manera empírica los tiempos de carga y descarga.

Sensor de temperatura

Se eligió el sensor LM335 de Texas Instruments [48] por su precisión (1 °C) y rango de operación de -40 °C a 100 °C, adaptándose al rango operativo típico de las BFRV (10 a 40 °C), facilidad de calibración (10 mV/°K), baja impedancia dinámica (<1 Ω) y corriente de operación entre 400 µA a 5 mA. Su función es supervisar la temperatura de la celda para evitar la precipitación de sustancias no deseadas en los electrolitos. Los parámetros de control generan alertas visuales 5 °C antes de los límites (15 y 35 °C), indicando al usuario tomar medidas preventivas. Si se alcanzan los límites (10 y 40 °C), la bomba se apaga para preservar los electrolitos, requiriendo reinicio manual. Dada la amplia capacidad del sensor, los límites pueden ajustarse según las condiciones experimentales.

Caudal de electrolito

El caudal del electrolito se controla mediante medidores de flujo y electroválvulas, pero las bombas peristálticas propuestas (EZO-PMP) ofrecen regulación electrónica precisa, eliminando la necesidad de válvulas y medidores de flujo. Estas bombas no solo recirculan el electrolito, sino que también permiten variar y conocer el caudal en tiempo real.

Sensor de nivel

Se eligió el sensor de nivel de líquido sin contacto XKC-Y25-PNP de Think Electronics [49] con tiempo de respuesta de 500 ms, ubicado externamente al tanque y sin contacto directo con el electrolito, evitando deterioro en medio ácido. Detecta la presencia de líquido por variaciones en el campo eléctrico. Su instalación permite cambios de posición sin afectar al sistema. Se coloca para detectar niveles menores a 50 mL. En caso de ocurrir, se apagan las bombas y se detiene la batería para revisar posibles fugas.

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v17i1.3423



PROPUESTA Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

Diagrama P&ID

Se diseñaron los diagramas de tuberías e instrumentación (P&ID por sus siglas en inglés *Piping and Instrumentation Diagram*) para este sistema. En estos diagramas se representan todos los instrumentos de medición y control que se incluyen dentro del sistema, así como las tuberías por donde pasa el fluido durante el proceso, ANSI [50]. (Figs. 7, 8, 9)

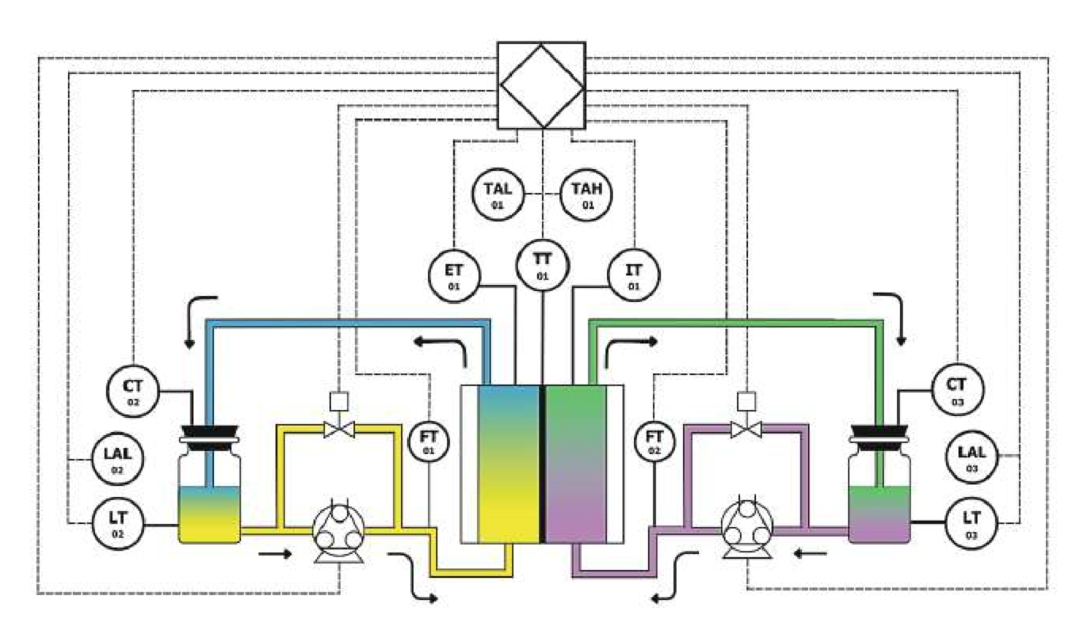


Figura 7. Diagrama P&ID con válvulas.



Figura 8. Leyenda para los diagramas P&ID.

El sistema propuesto implica la recirculación simétrica y cerrada del electrolito entre tanques y semiceldas. Sensores de temperatura, corriente y tensión transmiten datos al controlador Arduino UNO (lazo 1). El Arduino toma decisiones, como apagar bombas, para garantizar la seguridad del equipo y usuarios. Cuatro alarmas visuales indican niveles bajos en tanques o temperaturas extremas. Se presentan dos diagramas: uno con electroválvulas y medidores de flujo, y otro sin, optando por este último para simplificar el sistema, ya que las bombas propuestas pueden gestionar estas funciones.

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v17i1.3423



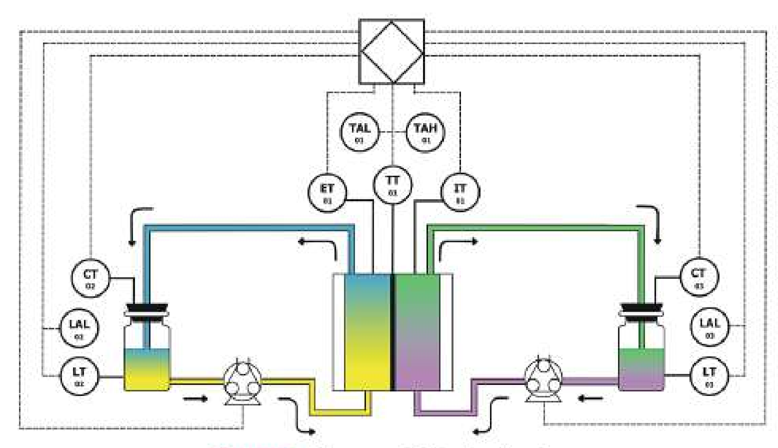


Figura 9. Diagrama P&ID sin válvulas.

Conexión de los sensores

Según lo establecido en los requerimientos, este prototipo cuenta con 14 instrumentos de medición o control: 7 sensores y 7 actuadores; esto se traduce en 7 entradas de datos y 7 salidas. Los actuadores son las dos bombas peristálticas y cinco LEDs (con sus respectivas resistencias de 330Ω) que sirven como alarmas visuales e indicadores de estado.

Los sensores de conductividad y las bombas peristálticas se conectan al Arduino UNO utilizando el protocolo de comunicación serial I^{2}C, que permite conectar varios periféricos a un mismo bus de data del controlador principal de forma síncrona. El Arduino UNO cuenta con pines suficientes e incluso pines restantes, por lo que permite la instalación de nuevos sensores en un futuro, en caso de que se quieran agregar nuevas variables de estudio.

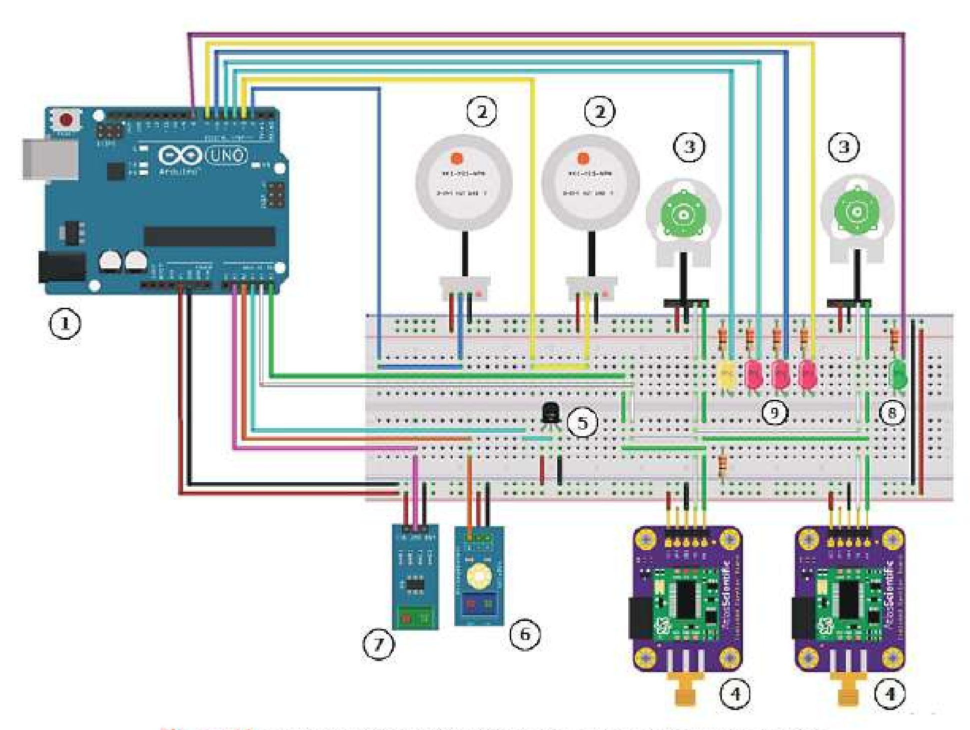


Figura 10. Propuesta de conexión del sistema de control y medición [47].

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v17i1.3423



En la Fig. 10 se muestra el diseño de conexiones propuesto para el sistema, controlado con un Arduino UNO (1). Cada sensor de nivel (2) está conectado a un pin digital. Se observa que las bombas (3) y los sensores de conductividad (4) están conectados a los mismos 2 pines, correspondientes al SCL (*System Clock*) y al SDA (*System Data*) del Arduino, cumpliendo con el protocolo de comunicación I2C.

En las entradas analógicas del controlador están conectados los tres sensores globales: temperatura (5), voltaje (6) y corriente (7).

El LED verde indica el funcionamiento óptimo de la celda, mientras que los rojos y el amarillo representan alertas visuales. El LED amarillo alerta de temperaturas precautorias, y el rojo indica temperaturas críticas, apagando la celda para prevenir problemas. Los LEDs rojos señalan niveles bajos en tanques.

Las bombas peristálticas requieren una fuente de 12V - 24V y se sugiere cableado apantallado para los sensores analógicos. El Arduino se conecta a una computadora mediante USB, permitiendo al usuario monitorear y guardar datos en Excel para análisis posterior.

Simulación en MATLAB

Se desarrolló una simulación en MATLAB para calcular el rendimiento teórico de la batería en condiciones variables. El usuario puede especificar parámetros iniciales, como área de electrodo, concentración de vanadio, volumen de electrolito, corriente de carga y rango de estado de carga. La simulación calcula el tiempo de carga estimado, potencia, capacidad nominal y caudal teórico, con la opción de obtener el caudal real mediante un factor de escala. También muestra gráficamente la variación del estado de carga, voltaje y concentración de iones de vanadio en función del estado de carga. Incluye un módulo de comparación de variables para analizar el comportamiento de parámetros en función de otros.

Los gráficos presentados en este módulo son:

- Capacidad energética en función del volumen del electrolito a diferentes concentraciones de vanadio inicial.
- Capacidad energética en función de la concentración inicial de vanadio a diferentes volúmenes de electrolito.
- Densidad de corriente en función de la corriente de carga utilizando los tres tamaños de electrodo propuestos.

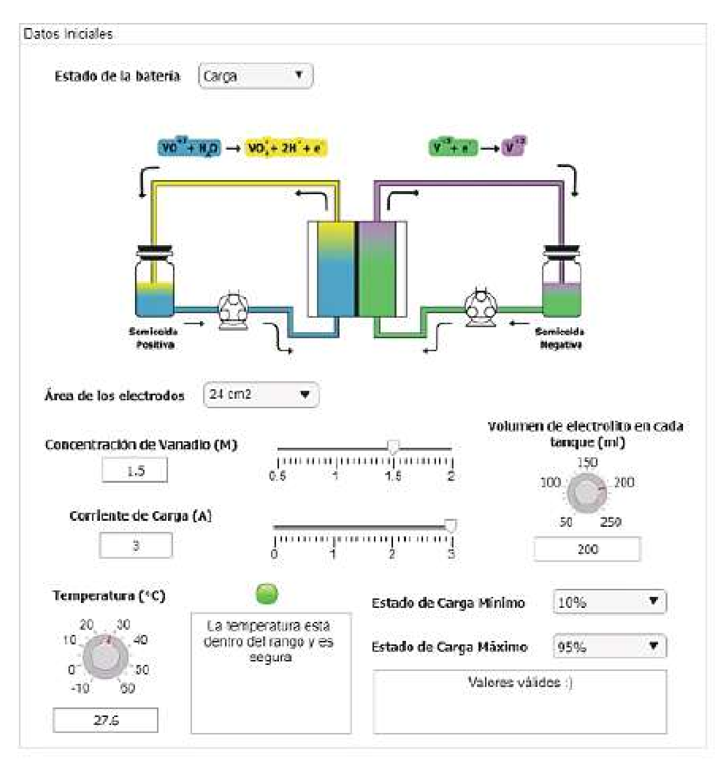
La simulación en MATLAB excluye la conductividad, al ser una variable experimental que requiere datos empíricos para su modelado. Los sensores de nivel no están representados, asumiendo un comportamiento ideal sin fugas de electrolito. En cambio, las alertas de temperatura y los indicadores de estado están incorporados en la simulación.

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v17i1.3423



BATERÍA FLUJO REDOX DE VANADIO

Hecho por: Laura de Jongh Salazar



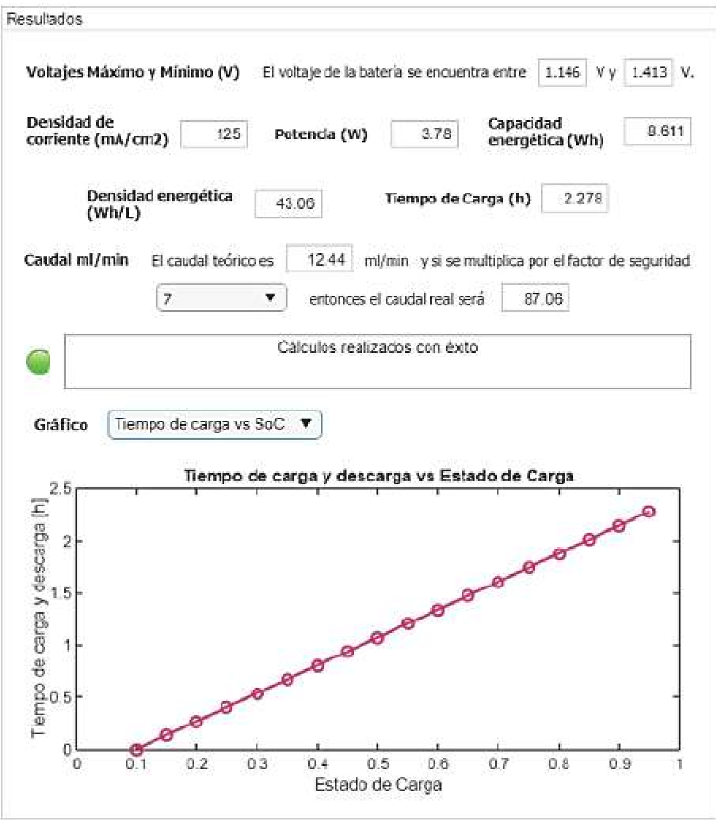


Figura 11. Captura de pantalla de la interfaz de la simulación en MATLAB sobre el funcionamiento de este prototipo.

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v17i1.3423



Diseño final del prototipo

Se presenta el diseño final del prototipo de BFRV. La Fig. 12 muestra la estructura interna de la celda, con una membrana (1) que divide la celda en dos semiceldas iguales, electrodos (2) dentro de marcos (3), conectados a canales de flujo (4). Los electrones viajan a través de placas bipolares hacia colectores de corriente compuestos por láminas de grafito flexible (5) y cobre (6). Todo está contenido por placas terminales (7) unidas con tornillos, ensambladas concéntricamente.

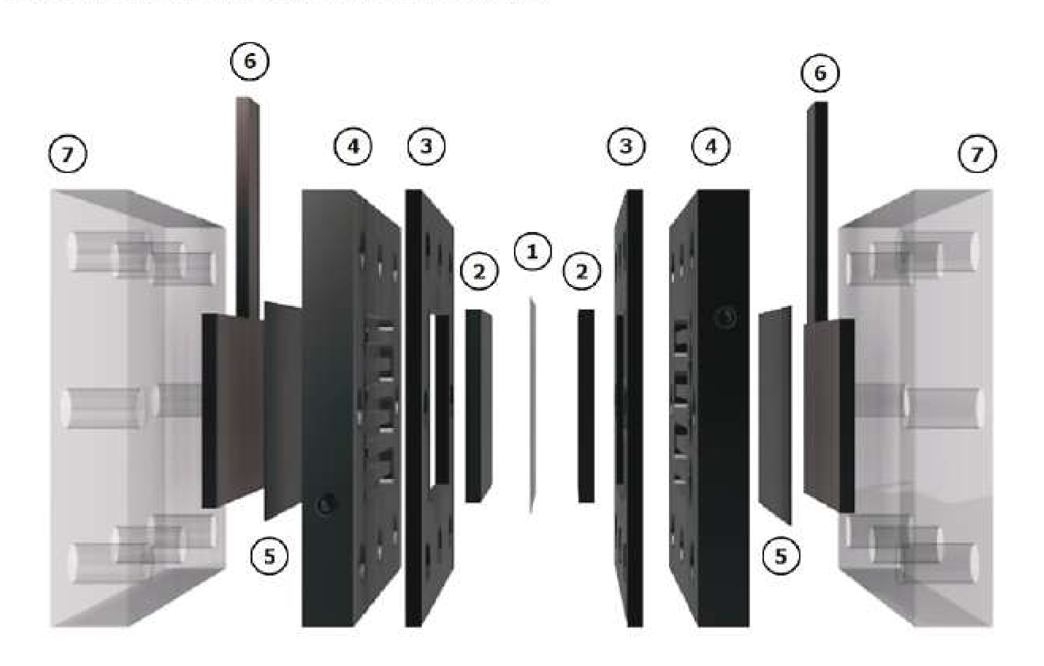


Figura 12. Detalle de los componentes internos del prototipo.

La celda ya ensamblada se puede ver en la Fig. 13. Sus dimensiones son 105 mm x 62.5 mm x 115.7 mm contando la altura de los colectores de corriente. Se utilizan 8 tornillos de 8 mm de diámetro y 75 mm de largo, con sus respectivas tuercas, para mantener las piezas unidas entre sí de forma segura. Las placas de flujo cuentan con dos boquillas cada una en sus extremos laterales: entrada y salida de electrolito.

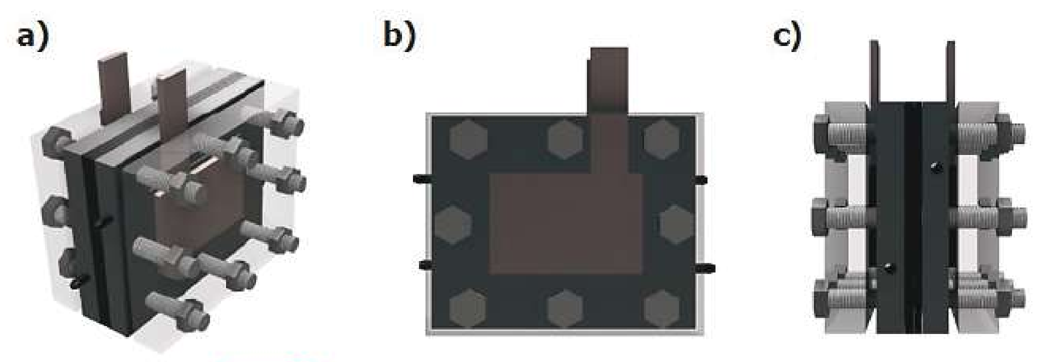


Figura 13. Vista isométrica (a), lateral (b) y frontal (c) de la celda.

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v17i1.3423



El montaje completo, incluyendo el sistema de recirculación del electrolito, se muestra en la Fig. 14. Ambas semiceldas cuentan con su bomba peristáltica (1), así como su respectivo sensor de conductividad (2) y sensor de nivel (3). También se observan los dos tanques de electrolito (4), desde los cuales salen las tuberías amarillas hacia las bombas peristálticas y luego hacia la celda (5); el electrolito después sale de la celda a través de las tuberías verdes hacia los tanques de nuevo, para ser recirculado.

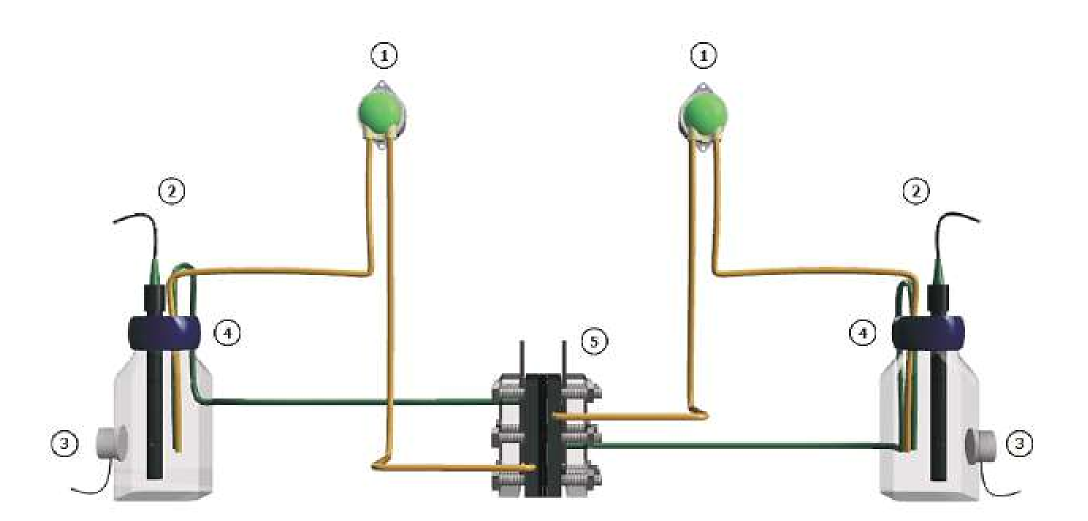


Figura 14. Montaje completo del sistema.

Las tapas de los tanques contarán con los orificios para las tuberías de alimentación y retorno a la celda y para el sensor de conductividad; el tanque del anolito debe tener un orificio extra para la entrada de nitrógeno. La longitud de las tuberías dependerá del espacio disponible para realizar el montaje. Ghirlanda [10] recomienda que el sistema se instale en una superficie impermeable o capaz de contener el líquido en caso de alguna fuga de electrolito.

En la tabla 8, se representa una comparativa de celdas BFRV investigadas por diferentes autores.



Tabla 8. Tabla comparativa entreceldas de BFRV desarrolladas por diversos autores.

Autores	Área de los electrodos	Material de los electrodos	Grosor de los electrodos	Material de los colectores de corriente	Material de los marcos	Material de las placas terminales	Concentración de Vanadio y ácido	Caudal de electrolito	Volumen de electrolito en cada tanque	Forma del canal de flujo	Material del canal de flujo	Material de los tanques
De Jongh Salazar et al (este trabajo)	6 - 12 - 24	Fieltro de carbono	3,175	Cobre laminado	PTFE o Teflón®	PMMA o Plexiglas®	$VOSO_4$ 0,5 a 2 M H_2SO_4 3 M	2 a 100 ml/min	50 a 250 ml	Serpentín	Bloques de grafito	Vidrio
Kumar & Jayanti [51]	100 cm^2	Fieltro de carbono	6 mm comprimido a 4,5 mm	Láminas de cobre	Silicona	Acrílico	2 M $VOSO_4$ 5 M H_2SO_4	58 ml/min	80 ml	Serpentín e interdigitado	Bloques de grafito	-
Sun et al. [52]	5 cm^2	Papel de carbono	0,4 mm	Láminas de cobre con chapa de oro	PTFE	Aluminio	1 M $VOSO_4$ 5 M H_2SO_4	-	-	Serpentín	Bloques de grafito	-
Al-Fetlawi [53]	100 cm^2	Fieltro de carbono	4 mm	Acero inoxidable	PTFE	PVC	1 a 1,5 M $VOSO_4$ 4 M H_2SO_4	60 ml/min a 180 ml/min	250 ml	-	-	Vidrio
Lee et al. [54]	9 cm^2	Fieltro de carbono	5 mm	Láminas de cobre	-	Aluminio	1,5 M $VOSO_4$ 3 M H_2SO_4	2 a 12 ml/min	10 ml	-	Bloques de grafito	-
Song et al. [4]	28 cm^2	Fieltro de carbono	4,4 mm y 5,2 mm comprimidos a 2 mm	Láminas de cobre y grafito	PTFE	PVC	0,5 a 1,7 M $VOSO_4$ 3 M H_2SO_4	40 ml/min a 45 ml/min	-	-	PVC	-
Hung et al. [55]	50 cm^2	Fieltro de carbono	2,5 mm	Acero inoxidable	Viton	Acrílico	1,58 $VOSO_4$ 3 M H_2SO_4	-	100 ml y 200 ml	Serpentín	Bloques de grafito	-
Zheng et al. [56]	9 cm^2	Fieltro de carbono	3 mm	-	-	Acero inoxidable	1,5 M $VOSO_4$ 3M H_2SO_4	30 ml/min a 150 ml/min	60 ml	Paralelo	-	-
Patiño [2]	25 cm^2	Fieltro de carbono	-	Láminas de cobre con chapa de oro	Silicona	-	1,6 M $VOSO_4$ 3 M H_2SO_4	20 ml/min	205 ml	Serpentín	Bloques de grafito	Polietileno de alta densidad
Aaron et al. [57]	5 cm^2	Papel de carbono	0,4 mm	Láminas de cobre con chapa de oro	-	-	1 M $VOSO_4$ 5 M H_2SO_4	20 ml/min	50 ml	Serpentín	Bloques de grafito	-
Al-Yasiri [41]	25 cm^2	Fieltro de carbono	6 mm	Grafito	PVC	Garolite	1,04 M $VOSO_4$ 4 M H_2SO_4	35 ml/min	100 ml	Serpentín	Bloques de grafito y PVC	-
Ghirianda [10]	25 cm^2	Fieltro de carbono	10 mm	Láminas de cobre y grafito	Gomas de silicona	PTFE	0,15 a 0,3 M V_2O_5 6 M H_2SO_4	2,5 ml/min a 16 ml/min	200 ml	-	-.	Vidrio
Roy [58]	4 cm^2	Fieltro de carbono	5 mm	Láminas de cobre	-	Acero inoxidable	0,2 M $VOSO_4$ 1,25 M H_2SO_4	180 ml/min	-	Serpentín	Bloque de Grafito	-

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v17i1.3423



Fallas potenciales en el prototipo de BFRV y medidas mitigantes

Este resumen abarca los principales riesgos y sus soluciones para garantizar un mejor rendimiento del prototipo:

1. Desbalance de electrolitos: puede causar ineficiencias en el estado de carga (SoC). Se sugiere monitoreo constante del nivel de electrolito y ajustes automáticos en la recirculación.

2. Fugas de electrolitos: producidas por sellos defectuosos o conexiones deficientes. Se recomiendan pruebas de presión, uso de materiales resistentes y un sistema de detección de fugas.

3. Degradación de la membrana: reduce la eficiencia con el tiempo. Se mitiga con membranas de alta calidad, control de temperatura y pH, y mantenimiento regular.

4. Contaminación de los electrolitos: disminuye la conductividad. La solución es garantizar la pureza del electrolito y usar filtros en el sistema de recirculación.

5. Pérdida de capacidad con el tiempo: aumenta con los ciclos de carga. Se mitiga con mantenimiento preventivo y monitoreo del rendimiento cíclico.

6. Problemas mecánicos: fallas en bombas o válvulas pueden afectar la recirculación. Se recomienda monitorear estos componentes y realizar mantenimiento preventivo [59, 60, 61, 62].

CONCLUSIONES

- El número de celdas, el área de los electrodos, el tipo de membrana a utilizar, la composición y cantidad del fluido, el tipo de flujo, el rango de SoC y la presencia de sistema de recirculación son los criterios que determinan el tamaño, la potencia y la capacidad energética de la batería.

- Las variables de estudio relevantes de las BFRV se pueden categorizar en variables a medir: conductividad, diferencia de potencial, corriente y tiempo de carga; variables a controlar: temperatura, volumen de electrolito y su caudal; y variables a estimar, que no pueden ser medidas empíricamente en un contexto experimental, como la concentración de iones de vanadio y el estado de carga.

- La configuración más eficiente para una BFRV a escala de laboratorio es utilizar una única celda con canales de flujo en forma de serpentín y un sistema de recirculación de electrolito. Al tener en cuenta el fin académico de este prototipo, se concluye que el $VOSO_4$ es la fuente de vanadio óptima, por su alta solubilidad en comparación con las otras opciones.

- Este diseño es versátil y adaptable a las necesidades del investigador; permite utilizar tres tamaños diferentes de electrodos y variar la concentración de vanadio,

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v17i1.3423



el volumen de electrolito y el caudal de recirculación, sin necesidad de cambiar todas las piezas de la batería.

- El sistema de monitoreo y control de variables de la batería, a través de un Arduino, permite obtener mediciones precisas y en tiempo real de las variables de estudio, facilitando la recolección de datos para su posterior análisis.

- El diseño propuesto tiene un costo aproximado de 1 025 $. Si bien los sensores de conductividad aumentan el presupuesto, se demostró que esta es una variable de estudio importante porque permite estimar el SoC de forma más precisa, por lo que se recomienda su inclusión en el prototipo, a pesar del alto costo.

- Los resultados teóricos esperados de esta batería, obtenidos a través de la simulación en MATLAB, son acordes a su aplicación, por lo que se considera que la construcción de este prototipo en la Universidad Metropolitana es viable y pertinente.

Dado que el proyecto está en la fase de diseño experimental y enfocado en su implementación a nivel de laboratorio con fines educativos, no se ha realizado un análisis financiero detallado. Aunque incluir un estudio de VAN y TIR podría aportar una perspectiva económica relevante, especialmente al evaluar la escalabilidad futura del prototipo para aplicaciones industriales o comerciales, esto queda fuera de los objetivos iniciales del proyecto.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Escuela de Ingeniería Química y al Departamento de Energía y Automatización de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Metropolitana en Caracas, Venezuela, por proporcionar los medios necesarios.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Investigación y tesis original: Laura de Jongh. Supervisión: José Barriola, tutoría: María Álvarez. Revisión y edición: Miguel Pérez.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los autores que aparecen en el artículo declaran que no existe ningún conflicto potencial de intereses relacionados con el mismo.



REFERENCIAS

[1] Rodríguez, J. (2021, 24 de noviembre). Medio ambiente: ¿podemos prescindir abruptamente de los combustibles fósiles? *BBC News Mundo*. https://www.bbc.com/mundo/noticias-59403447

[2] Patiño Cantero, I. (2020). *Diseño de un sistema a escala de laboratorio (4 W) de baterías de flujo redox de todo vanadio para investigación* [Tesis de pregrado, Universitat Politècnica de València]. https://riunet.upv.es/entities/publication/b77f3ec4-9d82-4ba2-ab56-d5feef3d1108

[3] Colt, G., Márquez, J., & Márquez, O. (2010). Evaluación de una celda Redox de Vanadio. *Universidad, Ciencia y Tecnología, 14*(56), 183-188. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-48212010000300005&lng=es&tlng=es

[4] Song, Y., Li, X., Yan, C. & Tang, A. (2020). Uncovering ionic conductivity impact towards high power vanadium flow battery design and operation. *Journal of Power Sources*, 480. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.229141

[5] López Ullauri, C. I., & Poma Tene, J. A. (2023). *Diseño y construcción de un prototipo a escala de laboratorio de una celda electroquímica de flujo redox de vanadio para almacenamiento de energía solar* [Trabajo de titulación, Universidad de Cuenca]. Repositorio Digital Universidad de Cuenca. https://dspace.ucuenca.edu.ec/items/e2890b35-195a-4570-9e22-f42e7334380d

[6] Belmonte, A., & Grespan, S. (2021). *Estudio de membranas para un prototipo de batería de flujo redox de vanadio* [Tesis de pregrado, Universidad Metropolitana]. https://unimet.ent.sirsi.net/custom/web/tesis/12/TP155B451.pdf

[7] Schofield, K. y Musilek, P. (2022). State of charge and capacity tracking in vanadium redox flow battery systems. *Clean Technologies, 4*(3), 607–618. https://doi.org/10.3390/cleantechnol4030037

[8] Ibáñez, A. (2020). *Diseño hidráulico de una instalación para una batería de flujo redox* [Tesis de pregrado, Universidad de Zaragoza]. https://zaguan.unizar.es/record/90141/files/TAZ-TFG-2020-006.pdf

[9] Al-Yasiri, M. A. (2020). A parametric analysis of the output voltage of all-vanadium redox-flow battery system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 871*. https://doi.org/10.1088/1757-899X/871/1/012007

[10] Ghirlanda, G. (2018). *Development of a vanadium redox flow battery for energy storage* [Tesis de maestría, Instituto Superior Técnico, Lisboa]. https://scholar.tecnico.ulisboa.pt/api/records/WeQZ9mr2SSCOrhKxYB7IwhrrU_cRr1vD8VIA/file/5ab31244359219030184d40e7175048d6ed0935c35f749a5dc4186a892275294.pdf

[11] Perdomo, M. (2021). *Análisis comparativo de los sistemas de baterías de flujo redox para su aplicación en el almacenamiento de energías renovables* [Tesis de pregrado, Universidad Metropolitana]. https://unimet.ent.sirsi.net/custom/web/tesis/12/ATTP155P433.pdf

[12] Rodríguez, R. M., Confortti, N., Pérez, M. & Sanoja, G. (2023). Evaluación de componentes internos de una BFRV conducente al diseño de un prototipo teórico. *Producción + Limpia, 18*(2). https://doi.org/10.22507/PML.V18N2A8

[13] Berkowitz, A., Caiado, A. A., Aravamuthan, S. R., Roy, A., Agar, E. & Inalpolat, M. (2024). Optimization framework for redox flow battery electrodes with improved microstructural characteristics. *Energy Advances, 3*(9). https://doi.org/10.1039/D4YA00248B

[14] Han, L., Chen, H., Cheng, X., He, Q., Chen, F. & Zhang, Q. (2023). Numerical analysis and optimization of flow rate for vanadium flow battery incorporating temperature effect. *Batteries, 9*(6). https://doi.org/10.3390/batteries9060312

[15] Charvát, J., Mazúr, P., Dundálek, J., Pocedič, J., Vrána, J., Mrlik, J., Kosek, J. y Dinter, S. (2020). Performance enhancement of vanadium redox flow battery by optimized electrode compression and operational conditions. *Journal of Energy Storage*, 30. https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101468

[16] Walsh, F. C., Cruden, A., & Hall, P. J. (2022). An introduction to electrochemistry in modern power sources. En A. Hauer (Ed.), *Advances in energy storage: Latest developments from R&D to the market* (Cap. 2). Wiley. https://doi.org/10.1002/9781119239390.ch2

[17] Schofield, K., & Musilek, P. (2022). State of charge and capacity tracking in vanadium redox flow battery systems. *Clean Technologies, 4*(3). https://doi.org/10.3390/cleantechnol4030037



[18] Loktionov, P., Pichugov, R., Konev, D., Petrov, M., Pustovalova, A. & Antipov, A. (2022). Operando UV/Vis spectra deconvolution for comprehensive electrolytes analysis of vanadium redox flow battery. *Journal of Electroanalytical Chemistry, 925*. https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2022.116912

[19] Shu, B., Weber, L. S., Skyllas-Kazacos, M., Bao, J., & Meng, K. (2023).Thermal modelling and simulation studies of containerised vanadium flow battery systems. *Batteries, 9*(4). https://doi.org/10.3390/batteries9040196

[20] Kim, S. (2019). Vanadium redox flow batteries: Electrochemical engineering. In M. Taha & A. Attia (Eds.), *Energy storage devices* (pp. 115–133). IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.85166

[21] Sun, J., Zheng, M., Yang, Z. & Yu, Z. (2019). Flow field design pathways from lab-scale toward large-scale flow batteries. *Energy, 173*. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.107

[22] Gundlapalli, R. & Jayanti, S. (2020). Performance characteristics of several variants of interdigitated flow fields for flow battery applications. *Journal of Power Sources, 467*. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228225

[23] Yang, P., Dong, S., Tang, J., Li, Y., Xiong, B., & Beng, G. H. (2022). A multi-physics model of vanadium redox flow battery for grid control. En *2022 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)* (pp. 1–5). IEEE. https://doi.org/10.1109/PESGM48719.2022.9916965

[24] Zhong, L. y Chu, F. (2023). A novel biomimetic lung-shaped flow field for all-vanadium redox flow battery. *Sustainability, 15*(18). https://doi.org/10.3390/su151813613

[25] Alcalde Bru, A. (2019). *Modelling of an energy storage system using redox flow batteries* [Trabajo de pregrado, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona]. https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/167411/tfg-albert-alcalde.pdf

[26] Guan, X., Skyllas-Kazacos, M. & Menictas, C. (2023). A three-dimensional hydraulic stack model for redox flow batteries considering porosity variations in porous felt electrodes and bypass flow in side gaps. *Batteries, 9*(7). https://doi.org/10.3390/batteries9070359

[27] Clemente, A., Montiel, M., Barreras, F., Lozano, A. & Costa-Castelló, R. (2021). Vanadium redox flow battery state of charge estimation using a concentration model and a sliding mode observer. *IEEE Access, 9*. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3079382

[28] Wang, J., Mu, A., Yang, B., Wang, Y. & Wang, W. (2024). Numerical simulation of all-vanadium redox flow battery performance optimization based on flow channel cross-sectional shape design. *Journal of Energy Storage, 93*. https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112409

[29] Puleston, T., Clemente, A., Costa-Castelló, R. & Serra, M. (2022). Modelling and estimation of vanadium redox flow batteries: A review. *Batteries, 8*(9). https://doi.org/10.3390/batteries8090121

[30] Chemours. (2022). *Nafion®: Materiales de intercambio iónico*. https://www.chemours.com/es/-/media/files/nafion/nafion-ion-exchange-membranes-brochure.pdf?la=es&rev=808f1636e2f0446a9b85e595b53cca2e

[31] Lourenssen, K., Williams, J., Ahmadpour, F., Clemmer, R. & Tasnim, S. (2019). Vanadium redox flow batteries: A comprehensive review. *Journal of Energy Storage, 25*. https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100844

[32] Huang, Z., Mu, A., Wu, L., Yang, B., Qian, Y. y Wang, J. (2022). Comprehensive analysis of critical issues in all-vanadium redox flow battery. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 10*(24). https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c01372

[33] Zhao, Y., Liu, L., Qiu, X. y Xi, J. (2019). Revealing sulfuric acid concentration impact on comprehensive performance of vanadium electrolytes and flow batteries. *Electrochimica Acta, 303*. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.02.062

[34] Berkowitz, A., Caiado, A. A., Aravamuthan, S. R., Roy, A., Agar, E. y Inalpolat, M. (2024). Optimization framework for redox flow battery electrodes with improved microstructural characteristics. *Energy Advances, 3*. https://doi.org/10.1039/D4YA00248B

[35] Charvát, J., Mazúr, P., Dundálek, J., Pocedič, J., Vrána, J., Mrlík, J., Kosek, J., & Dinter, S. (2020). Performance enhancement of vanadium redox flow battery by optimized electrode compression and operational conditions. *Journal of Energy Storage, 30*, 101468. https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101468

[36] Romanovskaia, E., Romanovski, V., Kwapinski, W. & Kurilo, I. (2021). Selective recovery of vanadium pentoxide from spent catalysts of sulfuric acid production: Sustainable approach. *Hydrometallurgy, 200*. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105568



[37] Olabi, A. G., Allam, M. A., Abdelkareem, M. A., Deepa, T. D., Alami, A. H., Abbas, Q., Alkhalidi, A. & Sayed, E. T. (2023). Redox flow batteries: Recent development in main components, emerging technologies, diagnostic techniques, large-scale applications, and challenges and barriers. *Batteries, 9*(8). https://doi.org/10.3390/batteries9080409

[38] Becker, M. y Turek, T. (2020). Combination of impedance spectroscopy and potential probe sensing to characterize vanadium redox-flow batteries. *Journal of Power Sources, 446*. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227349

[39] Chemours. (2024). *Teflon® PTFE: Fluoropolymers resins at a glance.* https://www.teflon.com/en/-/media/files/teflon/teflon-ptfe-resins-product-info.pdf?rev=71163f565b8f40988b77805cc1abe405

[40] Chemours. (2024). *Viton® PTFE: Solutions for extreme conditions*. Lagon Rubber. https://www.lagonrubber.com/wp-content/uploads/2024/05/Catalogo-LAGON-Viton_2024.pdf

[41] Al-Yasiri, M., & Park, J. (2018). A novel cell design of vanadium redox flow batteries for enhancing energy and power performance. *Applied Energy, 222*. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.025

[42] POLYVANTIS . (2024). *PLEXIGLAS® and EUROPLEX® films: Always on top*. https://www.plexiglas.de/files/plexiglas-content/pdf/broschuere/119-1-PLEXIGLAS-and-EUROPLEX-Films.pdf

[43] Atlas Scientific. (2024). *EZO-PMP™ embedded dosing pump.* V 3.0. Revised 3/24. https://files.atlas-scientific.com/EZO_PMP_Datasheet.pdf

[44] Atlas Scientific. (2022). *Conductivity Gen 2 probe K 10 platinum.* (v. 4.1). https://files.atlas-scientific.com/EC_K_10_probe.pdf

[45] Atlas Scientific. (2024). *EZO-EC™ Embedded Conductivity Circuit.* (v. 6.5). https://files.atlas-scientific.com/EC_EZO_Datasheet.pdf

[46] Allegro Microsystems. (2024). *ACS712: Fully integrated, Hall-effect-based linear current sensor IC with 2.1 kVRMS voltage isolation and a low-resistance current* conductor. https://www.allegromicro.com/-/media/files/datasheets/acs712-datasheet.pdf

[47] Arduino. (2025). *Arduino® UNO R3*: User manual SKU: A000066. https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000066-datasheet.pdf

[48] Texas Instruments. (2015). *LMx35, LMx35A precision temperature (Rev. E).* https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm235.pdf?ts=1743337889493&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FLM235

[49] Shenzhen XingKeChuang Technology Co., Ltd. (2020). *XKC-Y25-V liquid level sensor*: Manual (v. 1.6). https://www.xkc-sensor.com/upload/1686717723.pdf

[50] American National Standards Institute. (2024). *ANSI/ASME B31.3: Process piping* (Norma técnica No. 9780791876725).

[51] Kumar, S. y Jayanti, S. (2016). Effect of flow field on the performance of an all-vanadium redox flow battery. *Journal of Power Sources, 307*. 782-787. doi.org/101016-jjpowsour2016-01-048

[52] Sun, C., Delnick, F., Aaron, D., Papandrew, A., Mench, M. y Zawodzinski, T. (2013). Probing Electrode Losses in All-Vanadium Redox Flow Batteries with Impedance Spectroscopy. *ECS Electrochemistry Letters, 2*(5), A43-A45. doi.org/101149-2001305eel

[53] Al-Fetlawi, H. A.-Z. A.-Y. (2010). Modelling and simulation of all-vanadium redox flow batteries (Tesis doctoral, University of Southampton, Faculty of Engineering and the Environment, School of Engineering Sciences). https://eprints.soton.ac.uk/181523/1/Phd.pdf

[54] Lee, H., Choi, N. y Kim, H. (2014). Analysis of Concentration Polarization Using UV-Visible Spectrophotometry in a Vanadium Redox Flow Battery. *Journal of the Electrochemical Society, 161*(9), A1291-A1296. doi.org/101149-20631409jes

[55] Hung, Y., Bu, Y., Kubin, J., & Weinman, D. (2017). Effects of current scan rate on the polarization curve of vanadium redox flow batteries. En 2017 *International Energy and Sustainability Conference* (IESC) (pp. 1-4). Farmingdale, NY, USA. https://doi.org/10.1109/IESC.2017.8167489

[56] Zheng, Q., Zhang, H., Xing, F., Ma, X., Li, X. y Ning, G. (2014). A three-dimensional model for thermal analysis in a vanadium flow battery. *Applied Energy, 113*, 1675-1685. doi.org/101016-japenergy-2013-09-021



[57] Aaron, D., Liu, Q., Tang, Z., Grim, G., Papandrew, A., Turhan, A. y Zawodzinski, T. (2012). Dramatic performance gains in vanadium redox flow batteries through modified cell architecture. *Journal of Power Sources, 206*, 450-453. doi.org/101016-jjpowsour-2011-12-026

[58] Roy, A. (2018). Development Of An All Vanadium Redox Flow Battery For Efficient Utilization Of Renewable Energy [Tesis de Maestría, Indian Institute of Engineering Science and Technology]. doi.org/1013140-RG-2223646-95047

[59] Sankaralingam, R. K., Seshadri, S., Sunarso, J., Bhatt, A. I., & Kapoor, A. (2021). Overview of the factors affecting the performance of vanadium redox flow batteries. *Journal of Energy Storage.* https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102857

[60] Tian, W., Du, H., Wang, J., Weigand, J. J., Qi, J., Wang, S., & Li, L. (2023). A review of electrolyte additives in vanadium redox flow batteries. *Materials, 16*(13). https://doi.org/10.3390/ma16134582

[61] Gundlapalli, R., & Jayanti, S. (2021). Case studies of operational failures of vanadium redox flow battery stacks, diagnoses and remedial actions. *Journal of Energy Storage, 33.* https://doi.org/10.1016/j.est.2020.102078

[62] Ashok, A., & Kumar, A. (2024). A comprehensive review of metal-based redox flow batteries: progress and perspectives. *Green Chemistry Letters and Reviews, 17*(1). https://doi.org/10.1080/17518253.2024.2302834